Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy

مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی

مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال سی و دوم، شمارهٔ چهارم، زمستان ۱۴۰۳، از صفحهٔ ۷۲۵ تا ۷۳۸

سنگ شناسی و زمین شیمی سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه (شمال غرب انارک، ایران مرکزی)

احمد جمشیدزائی*، قدرت ترابی، رویا انصاری کیش

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴، نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۳/۱۶)

چکیده: کوه بندسیاه در ۵۵ کیلومتری شمال غرب انارک و کرانه غربی خردقاره شرق- ایران مرکزی واقع است. در منطقه مورد بررسی، سنگ‌های آتشفشانی ائوسن- الیگوسن با ترکیب بازیک تا حدواسط (بازالت و آندزیت) رخنمون داشته و آندزیت‌ها گسترش بیشتری دارند. بافت‌های غالب در این سنگ‌ها شامل پورفیری، گلومروپورفیری، تراکیتی و ریزسنگی پورفیری هستند. سنگ‌های آندزیتی کوه بندسیاه از کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز و آمفیبول و سنگ‌های بازالتی از کلینوپیروکسن به همراه پلاژیوکلاز و آمفیبول شکل گرفته‌اند. نتایج تجزیه زمین شیمیایی ماهیت سری ماگمایی آهکی قلیایی را برای سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه نشان می‌دهد. براساس الگوهای بهنجار شده با کندریت و نمودار چندعنصری بهنجار شده با گوشته اولیه، سنگ‌های مورد بررسی از نظر عناصر خاکی نادر سبک (LREE) وعناصر سنگ دوست درشت یون (LILE) غنی بوده و از عناصر با شدت میدان بالا(HFSE) تهی شده هستند. ناهنجاری منفی عناصر Ti، Nb و Ta در این سنگ‌ها به احتمال بسیار نشان دهنده‌ی فعالیت ماگمایی در ارتباط با کمان‌های ماگمایی بوده و شاخصی برای مناطق فرورانش کرانه فعال قاره‌ای هستند. بررسی‌های زمین شیمیایی و زمین ساختی نشان می‌دهد که ماگمای سازنده سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه در اثر ذوب بخشی کمتر از ۱۵ درصد گوشته دگرنهاده شده از نوع اسپینل لرزولیت تشکیل شده است.

واژه‌های کلیدی: *سنگ‌شناسی؛ سنگ‌های آتشفشانی؛ ائوسن- الیگوسن؛ کوه بندسیاه؛ انارک؛ خردقاره شرق- ایران مرکزی.*

مقدمه

یکی از سوالات اساسی در مباحث سنگ شناسی آذرین مربوط به خاستگاه ماگماهای اسیدی، حدواسط و مافیک در نواحی فرورانش و سایر محیط‌های زمین ساختی است. بررسی های تجربی نشان می‌دهد که مذاب‌های اولیه برآمده از پوسته و همچنین گوشته در تشکیل سنگ‌های مافیک تا حدواسط نقش اساسی دارند. نتایج زمین شیمیایی بازالت‌ها و آندزیت‌ها، تغییرات قابل‌توجهی را در مقادیر عناصر کمیاب، عناصر خاکی نادر و ایزوتوپ‌های مختلف برای این سنگ‌ها نشان می‌دهند که این تغییرات منجر به تعریف خاستگاه‌های مختلف پوسته‌ای و گوشته‌ای برای این سنگ‌ها شده است.

در اثر فعالیت‌های آتشفشانی وابسته به محیط‌های فرورانش، ترکیب‌های متنوعی از بازالت و آندزیت تا داسیت و ریولیت تشکیل می‌شوند [۱-۴]. ترکیب شیمیایی فراورده‌های خروجی از دهانه آتشفشان افزون بر تعیین نقش پوسته در فعالیت ماگمایی، اثر بخش‌های مختلف پوسته (پوسته زیرین، میانی و بالایی) را در فرایندهایی چون ذوب بخشی، جدایش ماگمایی، هضم و آلایش ماگمایی نیز مشخص می‌سازد [۴]. در فعالیت ماگمایی در ارتباط با فرورانش، بخش‌های مختلفی چون گوه گوشته‌ای، پوسته اقیانوسی فرورانده، رسوب‌های همراه با پوسته فرورانده شده و پوسته قاره‌ای نقش دارند [۵].

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۵۶۰۹۴۵۹۷، پست الکترونیکی: a.jamshidzaei@gmail.com

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.725]

فعالیت ماگمایی سنوزوئیک در شمال غرب خرد قاره شرق- ایران مرکزی شامل ماگماهای آهکی قلیایی (پالئوسن و ائوسن)، شوشونیتی (ائوسن میانی) و قلیایی (الیگوسن) است [۶-۸]. بیشترین حجم فعالیت آتشفشانی در این ناحیه مربوط به زمان ائوسن میانی است [۹]. بازالت‌های قلیایی الیگوسن در بخش میانی تویره [۶]، سنگ‌های آتشفشانی آهکی قلیایی در جنوب شرق خور [۷]، واحدهای شوشونیتی و آهکی قلیایی در گدار سیاه [۸، ۹]، سنگ‌های آتشفشانی آهکی قلیایی پتاسیم بالا در انارک [۱۰]، بازالت‌های قلیایی تویره در جنوب غربی جندق [۱۱]، عشین [۱۲] و عروسان [۱۳] از جمله سنگ‌های آتشفشانی در ارتباط با فرورانش این زمان در منطقه مورد بررسی هستند. افزون بر واحدهای آتشفشانی، گرانیتوییدهای تویره در جنوب غربی جندق [۱۴] نیز از جمله واحدهای وابسته به ماگمایی سنوزوییک در این منطقه محسوب می‌شوند.

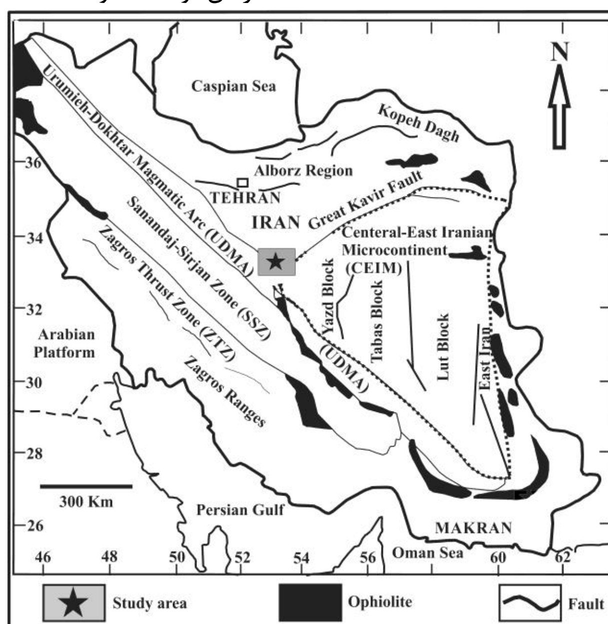
منطقه انارک در فاصله ۲۲۰ کیلومتری شمال شرق اصفهان و ۷۵ کیلومتری شمال شرقی شهرستان نایین واقع است. این منطقه در کرانه جنوبی دشت کویر (کویر مرکزی) و بین طول های جغرافیایی ۵۳-۵۴ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۳-۳۴ درجه شمالی قرار دارد.

در منطقه انارک، آثار فعالیت‌های آتشفشانی ائوسن را می-توان به صورت تنوره‌های کوچک، گدازه و گنبد به اندازه چند متر تا چند صد متر با روند تقریبی شرقی- غربی مشاهده کرد. رخنمون این واحدهای سنگی در منطقه اغلب از روند گسل های منطقه پیروی می‌کند. این سنگ‌های آتشفشانی در گستره انارک در مناطقی چون معلی، شمال عشین- زوار، سرخشاد، سفی آباد، درختک و کوه بندسیاه رخنمون دارند.

در این پژوهش سنگ‌های آتشفشانی ائوسن-الیگوسن کوه بندسیاه (شمال غربی انارک) از نظر ویژگی‌های سنگ‌شناسی، شیمیایی و محیط زمین ساختی بررسی شده‌اند.

زمین شناسی منطقه

سرزمین ایران در بخش میانی سامانه کوهزایی آلپ- هیمالیا قرار دارد. این سرزمین از جنبه‌های مختلفی چون مرزهای ساختاری و زمین ساختی، فعالیت ماگمایی و چینه‌شناسی به چند پهنه تقسیم شده است. از نظر ساختاری، مهم‌ترین پهنه-های سرزمین ایران شامل زاگرس، سنندج- سیرجان، کمان ماگمایی ارومیه- دختر، خرد قاره شرق- ایران مرکزی، البرز، کپه داغ، شرق ایران و مکران هستند [۱۵] (شکل ۱). خردقاره شرق- ایران مرکزی در بخش شرقی کمربند ماگمایی ارومیه— دختر و بین گسل‌های کویر بزرگ، نایین-دهشیر- بافت، گسل نهبندان و مجموعه‌های افیولیتی نایین، عشین، سورک، بافت، شهربابک، چهل کوره و افیولیت سبزوار قرار دارد [۱۶]. خردقاره شرق- ایران مرکزی با توجه به فعالیت‌های زمین ساختی و عملکرد گسل‌ها به چند واحد کوچک‌تر تقسیم شده است که از غرب به شرق شامل قطعه یزد (نایین)، قطعه طبس (کرمان) و قطعه لوت هستند.



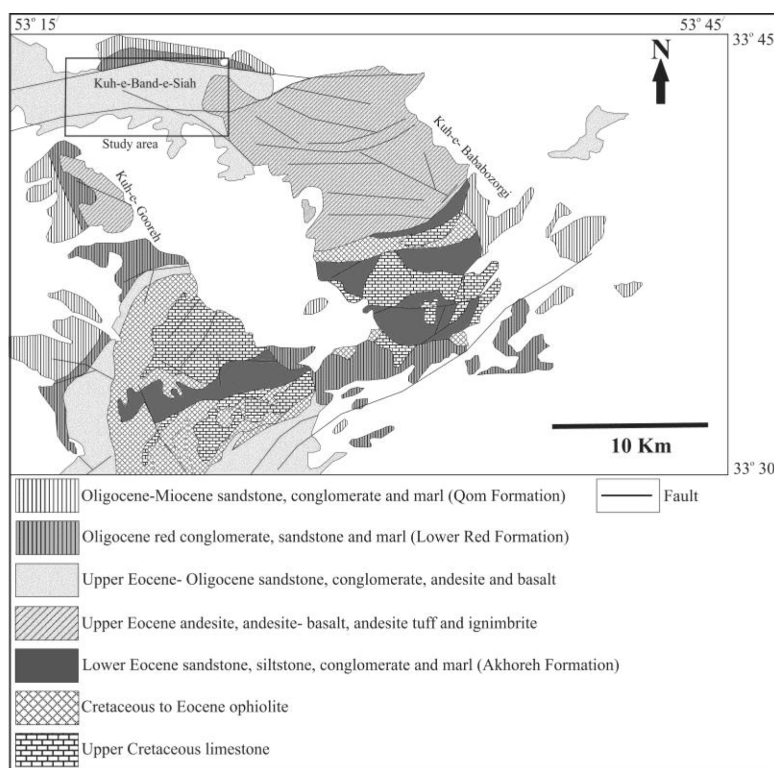
شکل ۱ مهمترین واحدهای ساختاری ایران، برگرفته از مرجع [۱۷] با تغییرات و موقعیت منطقه بندسیاه در شمال غرب خرد قاره شرق- ایران مرکزی (CEIM).

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.725]

منطقه انارک در تقسیمات پهنه‌های زمین شناسی ایران بخشی از پهنه ایران مرکزی محسوب می‌شود [۱۸]. این منطقه را با توجه به ویژگی‌های ساختاری و سنگ شناسی به چند پهنه و ناحیه ساختاری تقسیم کرده‌اند [۱۸] که عبارتند از ناحیه انارک- خور، پشت بادام، پهنه چین خورده سیمرین پسین چاه پلنگ- بیاضه، پهنه چین خورده آلپی پیشین بیابانک، پهنه افیولیتی نایین- زوار (پهنه آمیزه رنگی)، پهنه-های آلپی کوه دم و قلعه سردار، پهنه گودی‌ها و حوضه‌های فرعی آلپی بالایی. از آنجا که منطقه مورد بررسی در توده انارک- خور قرار دارد، در این جا مهم‌ترین ویژگی‌های زمین شناسی این بخش بیان می‌شود.

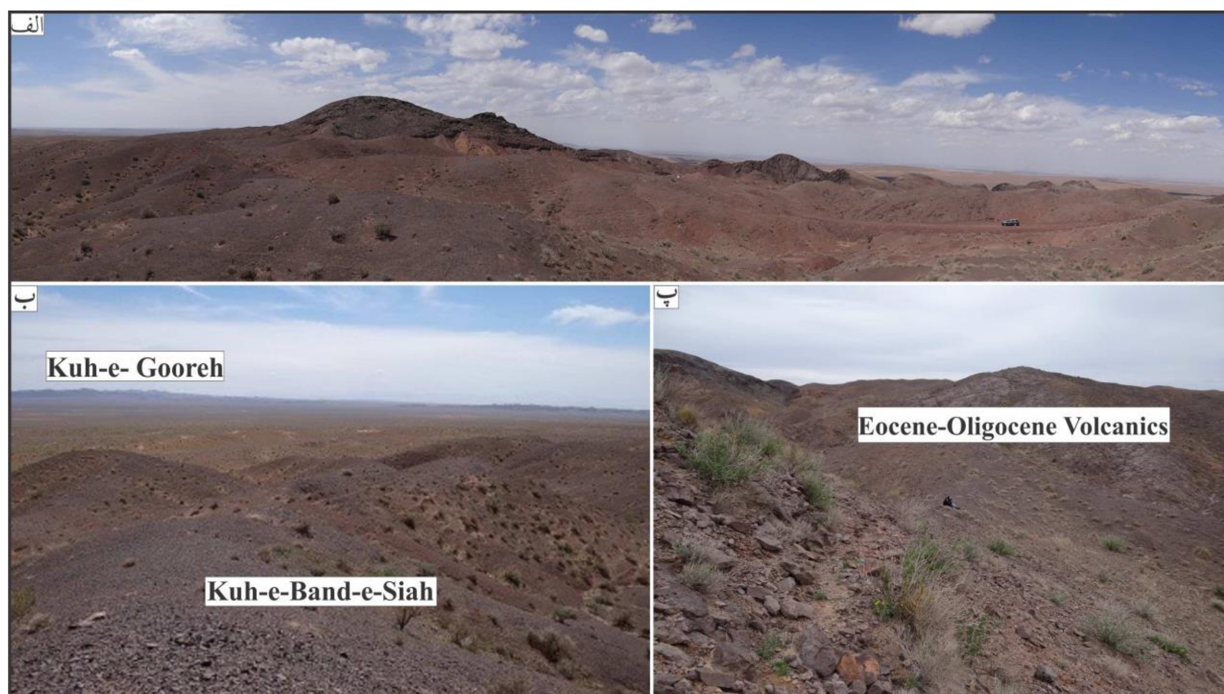
توالی ضخیمی از دگرگونی‌های انارک به سن پروتروزوئیک پسین- پالئوزوئیک پی سنگ انارک- خور را تشکیل داده‌اند [۱۹]. این توالی شامل مجموعه سنگ‌های دگرگون شده در رخساره‌های شیست سبز و آمفیبولیت است، سنگ خاستگاه این دگرگونی‌ها ماسه سنگ تیره، آرکوز، ماسه سنگ، سنگ-های رسی و آتشفشانی‌های بازیک است [۱۹]. سنگ‌های پالئوزوئیـک در ناحیه انارک- خور گسترش زیادی دارند و بهترین رخنمون آنها در کوه معراجی دیده می‌شود که توالی کاملی از کامبرین پیشین (سازندهای سلطانیه و باروت) تا پرمین (سازند جمال) را شامل می‌شوند [۱۹]. در ناحیه انارک- خور، سنگ‌های کرتاسه عمده‌ترین رخنمون سنگ‌های مزوزوئیک را تشکیل می‌دهند، این سنگ‌ها در ناحیه خور گستردگی زیادی دارند. سن واحدهای کرتاسه در منطقه انارک از کرتاسه پیشین (آپتین) تا کرتاسه پسین (ماستریشتین) است [۱۹]. همچنین در گستره نخلک، سنگ‌های تریاس با ضخامت زیاد به صورت سه سازند علم، باقرق و عشین وجود دارند [۱۹]. فعالیت ماگمایی ایران مرکزی طی ائوسن اغلب شامل فعالیت‌های آتشفشانی بوده که در اثر رویداد آلپ میانی صورت گرفته است [۱۲].

در منطقه کوه بندسیاه در شمال غرب انارک، بخشی از این فعالیت آتشفشانی ائوسن دیده می‌شود. کوه بندسیاه با راستای شمال غرب- جنوب شرق در کرانه غربی قطعه یزد یا نایین واقع بوده و در معرض فعالیت گسل‌هایی چون گسل کویر بزرگ (درونه) و گسل بابابزرگی قرار گرفته است (شکل ۲). در بخش غربی کوه بندسیاه همراه با سنگ‌های آتشفشانی، واحدهای مختلفی چون کنگلومرا، ماسه سنگ، توف و آگلومرا وجود دارند که بیانگر یک محیط ناآرام همراه با فعالیت آتشفشانی است و شباهت منطقه مورد بررسی با سازند فیلیشی سهلب در نزدیکی کوه قبله و معادن تالمسی و مسکنی را تایید می‌کند (شکل ۳).



شکل ۲ نقشه زمین شناسی ساده شده منطقه کوه بندسیاه در بخش شمال غرب انارک (برگرفته از مرجع [۱۹]).

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.725]



شکل ۳ تصاویر صحرایی از منطقه کوه بندسیاه و رخنمون سنگ‌های آتشفشانی ائوسن-الیگوسن با ترکیب غالب آندزیت و به مقدار کمتر بازالت: الف) نمایی کلی از منطقه مورد بررسی (دید به سمت شمال)، ب) موقعیت سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه نسبت به کوه گوره (دید به سمت جنوب) و پ) نمایی از رخنمون سنگ‌های آتشفشانی در منطقه کوه بندسیاه (دید به سمت شمال شرق).

روش بررسی

پس از بررسی‌های صحرایی و نمونه‌برداری از بخش‌های مختلف سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه، نمونه‌های مناسب برای تهیه مقاطع نازک انتخاب گردید. بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانی شناسی این نمونه‌ها با میکروسکوپ قطبشی المپوس BH2 در دانشگاه اصفهان انجام شد.

برای بررسی‌های زمین شیمیایی سنگ کل، نمونه‌های سالم و کمتر دگرسان شده انتخاب و با روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) در شرکت کانساران بینالود تجزیه شیمیایی گردیدند. برای محاسبه مقادیر FeO و Fe_2O_3 از $Fe_2O_3^*$ از نسبت ارائه شده توسط میدلموست [۲۰] استفاده شد.

سنگ‌نگاری

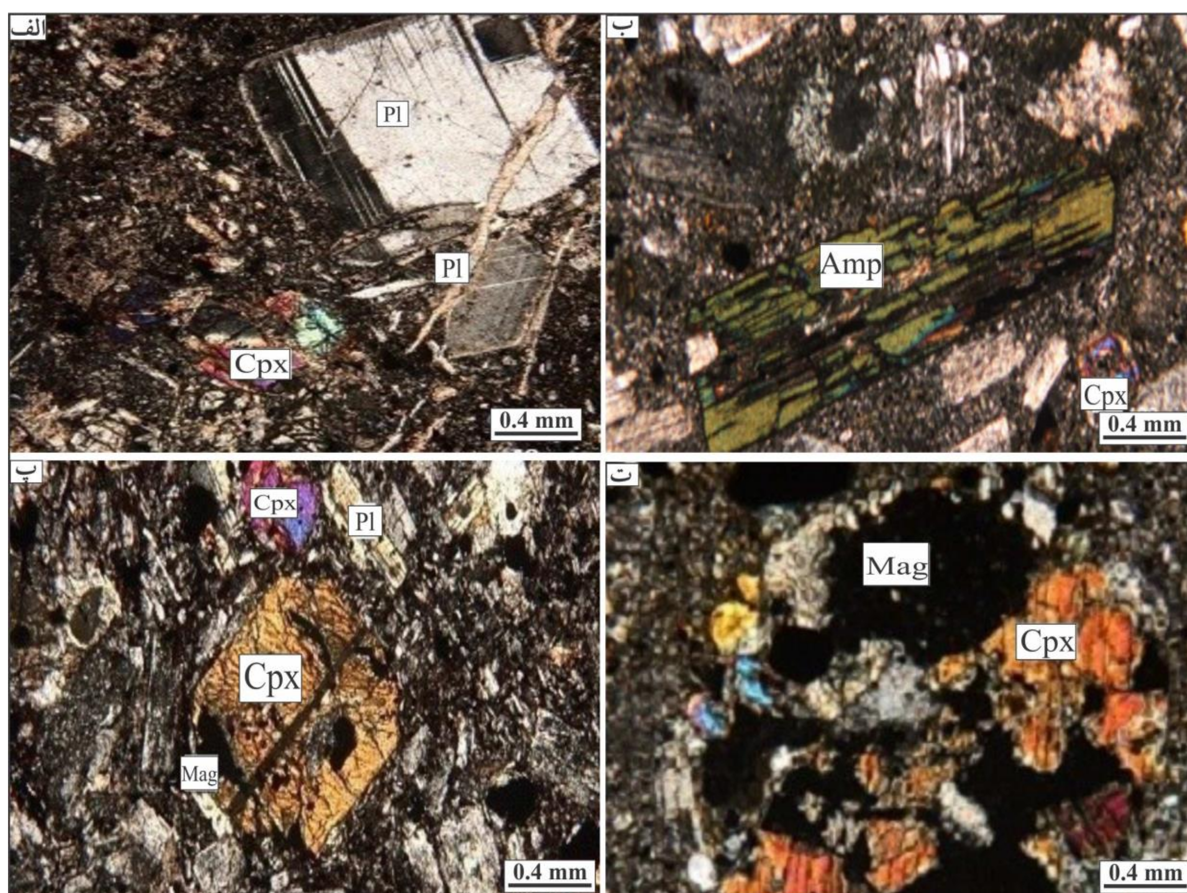
مهم‌ترین سنگ‌های آتشفشانی در منطقه مورد بررسی آندزیت تا بازالت هستند. آندزیت‌ها نسبت به بازالت‌ها فراوانی بیشتری دارند. بافت‌های عمده موجود در این سنگ‌ها شامل پورفیری، گلومروپورفیری، تراکیتی و ریزسنگی پورفیری هستند (شکل ۴). کانی‌های تشکیل دهنده‌ی این آندزیت‌ها را می‌توان به دو گروه کانی‌های اصلی و کانی‌های ثانویه تقسیم کرد. کانی‌های اصلی شامل درشت بلورهای پلاژیوکلاز، آمفیبول، کلینوپیروکسن، کوارتز و به مقدار کمتر فلدسپات پتاسیم هستند (شکل ۴)، فراوانی این درشت بلورها حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد حجمی است. همچنین در چند نمونه که براساس نتایج تجزیه سنگ کل در گستره بازالت قرار دارند، کانی کلینوپیروکسن در بازالت‌ها نسبت به این کانی در آندزیت‌ها فراوانی بیشتری دارد. درصد پایین درشت بلورها بیانگر توقف کوتاه ماگما در اتاقک ماگمایی است. کانی‌های اصلی در سنگ-های مورد بررسی هم به صورت درشت‌بلور و هم به صورت ریزبلور در زمینه سنگ دیده می‌شوند. کانی‌های ثانویه برآمده از دگرسانی شامل کلریت، کلسیت، سریسیت و مگنتیت هستند. کلریت و مگنتیت در اثر دگرسانی کلینوپیروکسن و آمفیبول و سریسیت در نتیجه دگرسانی فلدسپات‌ها ایجاد شده‌اند.

پلاژیوکلازها به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار هستند (شکل ۴ الف) و در برخی از نمونه‌ها با لبه‌های فرو رفته و دارای خوردگی خلیجی دیده می‌شوند. این بلورها بیشترین فراوانی را در سنگ‌های آندزیتی کوه بندسیاه دارند. پلاژیوکلازها هم به‌صورت درشت بلور و هم به صورت ریزسنگ در زمینه

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.725]

سنگ‌های مورد بررسی دیده می‌شوند که نشان‌دهنده دست کم دو مرحله سردشدن ماگما بوده و ریزسنگ‌ها مربوط به زمان فوران هستند. وجود منطقه‌بندی، خوردگی و شکل‌های تیغه‌ای در پلاژیوکلازها نشانگر تفاوت در شرایط فشار تبلور این کانی‌هاست (شکل ۴ الف). نتایج تجزیه نقطه‌ای کانی پلاژیوکلاز نشان می‌دهد که پلاژیوکلازهای مورد بررسی دارای ترکیب آندزین تا لابرادوریت هستند.

آمفیبول از کانی‌های اصلی در سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه است (شکل ۴ ب). آمفیبول‌های موجود در این سنگ - ها اغلب در آندزیت‌ها حضور دارند و به حالت دگرسان و به رنگ قهوه‌ای و سوخته دیده می‌شوند. در برخی از نمونه‌ها، آمفیبول‌های دگرسان شده با کربنات جایگزین شده و برخی از این نمونه‌ها با حلقه‌ای از کانی‌های کدر در برگرفته‌اند.
بلورهای کلینوپیروکسن به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار هستند و فراوانی چندانی ندارند. در سنگ‌های با ترکیب بازیک-تر در گستره بازالت، کلینوپیروکسن‌ها فراوانی بیشتری دارند. کلینوپیروکسن‌ها در سنگ‌های بازالتی مورد بررسی به صورت شکل‌دار، ریزبلور و نیمه‌شکل‌دار وجود دارند (شکل ۴ پ). در برخی از نمونه که تا حدی دگرسان شده‌اند، کلینوپیروکسن‌ها به کانی‌هایی چون مگنتیت و کلریت تجزیه شده‌اند (شکل ۴ ت). در لبه برخی از درشت بلورهای کلینوپیروکسن، خوردگی و فرورفتگی دیده می‌شود که نشان‌دهنده نبود تعادل در زمان تبلور و تبلور کانی طی صعود ماگما و کاهش فشار است. همچنین لبه‌های خورده شده پیرامون کانی‌هایی چون پلاژیوکلازها و کوارتز و بافت غربالی در پلاژیوکلازها درون سنگ های آتشفشانی کوه بندسیاه از جمله شواهد سنگ‌نگاری مربوط به آلایش ماگمایی هستند.



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه در شمال غرب انارک: الف) درشت بلورهای پلاژیوکلاز با ماکل چندریختی در نور قطبیده متقاطع، XPL)، ب) درشت بلور آمفیبول همراه با درشت بلورهای پلاژیوکلاز در زمینه ریزدانه (XPL)، پ و ت) درشت بلورهای کلینوپیروکسن که در برخی از نمونه‌ها دگرسان شده و کانی‌های کدر چون مگنتیت تشکیل شده‌اند (XPL). نشانه های اختصاری استفاده شده برای نامگذاری کانی‌ها برگرفته از ویتنی و اوانز [۲۱] هستند.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.725]

شیمی سنگ کل

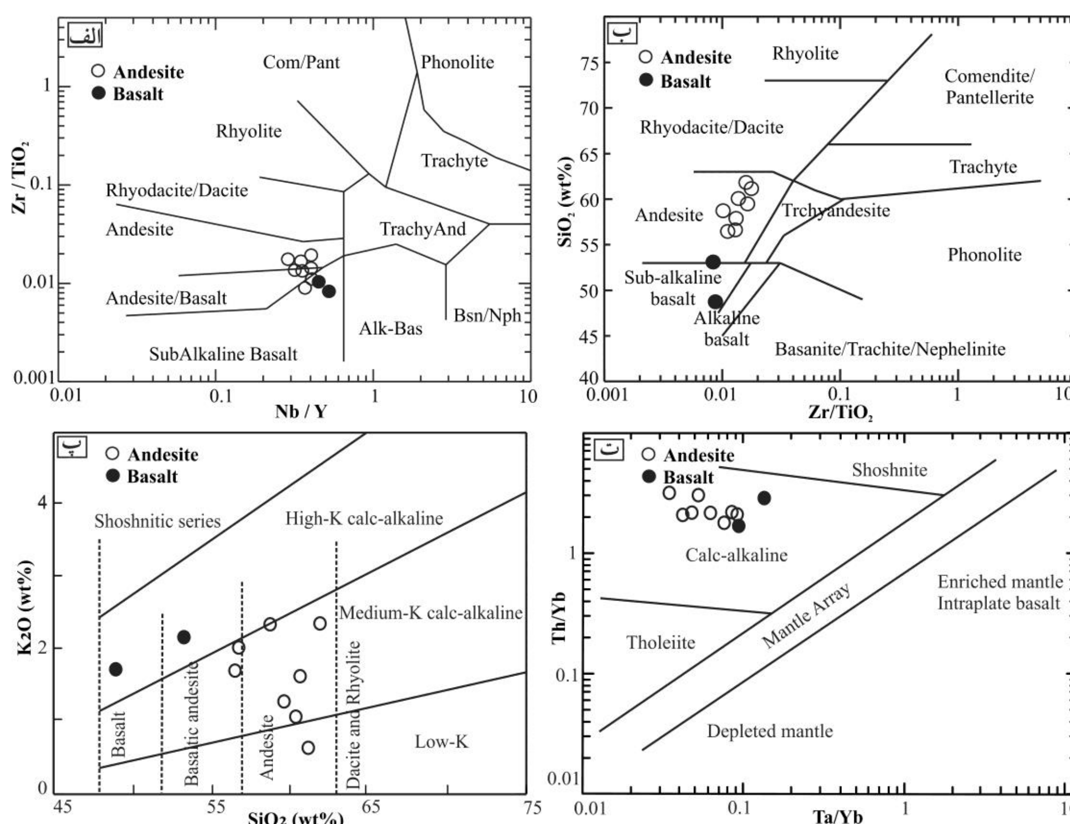
نتایج تجزیه شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه در جدول ۱ آورده شده است. دیده می‌شود که مقدار SiO2 در این سنگ‌ها از ۴۸/۷۴ تا ۶۲/۰۸ درصد وزنی (به طور میانگین؛ ۵۷/۸۶) است. همچنین مقدار Al_2O_3 و TiO_2 در سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه به ترتیب برابر با ۱۰/۸۴ تا ۱۷/۷۶ درصد وزنی و ۰/۵۷ تا ۰/۸۶ درصد وزنی است. مجموع عناصر قلیایی (Na_2O+K_2O) در این سنگ‌ها برابر با ۵/۷۶ تا ۸/۸۴ درصد وزنی است. مقدار مواد فرار (LOI) در این سنگ‌ها برابر با ۲/۹۳ تا ۴/۴۳ درصد وزنی (به طور میانگین؛ ۳/۵۱) بوده که بیانگر اثر دگرسانی بر تعدادی از نمونه‌ها و حضور کانی‌های آبدار چون آمفیبول است.

براساس مقادیر SiO_2- Zr/TiO_2 و Zr/TiO_2 نسبت به Nb/Y، ترکیب غالب سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه آندزیتی و به مقدار کمتر بازالتی است (شکل‌های ۵ الف و ب). برای تعیین سری ماگمایی سنگ‌های کوه بندسیاه از نمودارهای مراجع [۲۲، ۲۳] استفاده گردید. با توجه به مقادیر K_2O نسبت به SiO_2 و همچنین نسبت Th/Yb، در مقابل Ta/Yb سنگ‌های مورد بررسی ماهیت ماگماهای آهکی‌قلیایی را نشان می‌دهند (شکل‌های ۵ پ و ت).

جدول ۱ ترکیب شیمیایی سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه (عناصر اصلی بر حسب wt.% و عناصر فرعی بر حسب ppm). (نمونه‌های R1 و R9 از نوع سنگ بازالت و سایر نمونه‌ها از نوع آندزیت هستند).

نمونه	*R1	R2	R4	R8	*R9	R20	R21	R22	R30	R130	R140
SiO2	۵۳۳۳	۵۶/۶۳	۵۸/۹۰	۵۹/۶۶	۴۸/۷۴	۶۲/۰۸	۶۰/۷۸	۶۰/۲۶	۶۱/۴۰	۵۶/۷۹	۵۸/۰۸
TiO2	۰/۸۶	۰/۶۲	۰/۵۷	۰/۶۹	۰/۸۶	۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۷۰	۰/۷۹	۰/۷۲	۰/۶۹
Al2O3	۱۵/۱۴	۱۵/۷۵	۱۴/۲۶	۱۴/۷۵	۱۷/۷۶	۱۱/۷۷	۱۰/۸۴	۱۱/۷۶	۱۲/۹۵	۱۵/۲۱	۱۴/۸۹
Fe2O3*	۸/۳۰	۶/۸۸	۶/۲۶	۶/۰۶	۸/۳۸	۶/۲۰	۶/۴۹	۶/۵۹	۵/۸۸	۷/۱۵	۶/۸۱
MnO	۰/۱۹	۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۹	۰/۱۸
MgO	۳/۱۱	۲/۸۵	۳/۱۹	۲/۶۲	۳/۰۳	۱/۵۶	۱/۷۹	۱/۹۳	۰/۸۲	۳/۷۲	۳/۴۷
CaO	۹/۱۷	۷/۵۱	۶/۴۹	۵/۰۷	۱۱/۶۷	۵/۹۰	۷/۴۷	۶/۲۰	۵/۴۳	۷/۱۲	۷/۲۲
Na2O	۴/۶۱	۴/۳۸	۴/۶۳	۶/۴۲	۴/۰۸	۵/۳۴	۵/۷۷	۷/۳۳	۸/۲۸	۳/۹۷	۳/۶۶
K2O	۲/۲۰	۱/۶۴	۲/۳۱	۱/۱۹	۱/۶۸	۲/۳۰	۱/۵۴	۱/۰۱	۰/۵۶	۱/۹۳	۱/۹۷
P2O5	۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۱۵	۰/۲۰	۰/۲۶	۰/۱۶	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۲۹	۰/۲۲	۰/۱۷
LOI	۲/۹۳	۳/۵۷	۳/۱۱	۳/۲۲	۳/۳۸	۳/۹۴	۴/۴۳	۴/۰۳	۳/۴۹	۲/۹۷	۲/۸۴
مجموع	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۹۹	۹۹/۹۹	۱۰۰	۹۹/۹۸	۹۹/۹۸	۹۹/۹۹	۹۹/۹۸
Cr	۱۶	۱۹	۱۷	۱۳	۱۴	۱۳	۱۲	۱۵	۱۲	۱۵	۱۳
Ni	۱۱	۱۶	۱۵	۶	۷	۵	۵	۹	۵	۹	۴
Co	۲۱	۱۴	۱۸	۱۷	۲۰	۱۰	۱۲	۱۱	۶	۱۷	۱۶
V	۱۷۵	۱۴۹	۱۰۱	۱۳۰	۱۷۸	۱۳۹	۱۵۵	۱۴۴	۹۸	۱۳۵	۱۳۷
Cu	۴۹	۵	۶	۴۲	۱۱	۲۳	۲۵	۲۴	5	۶۹	۷۰
Pb	۱۵	۱۰	۲۶	۸	۸	۱۲	۱۰	۱۰	۱۶	۲۱	۳۴
Zn	۹۶	۶۵	۱۵۳	۱۰۶	۷۵	۵۱	۵۳	۴۳	۷۱	۱۱۰	۱۳۹
Cd	۱/۱۲	۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۹۸	۱/۲۳	۱/۰۲	۱/۳۶	۰/۹۵	۱/۰۶	۱/۰۳	۱/۰۳
Sn	۱/۴۳	۱/۱۲	۱/۱۰	۱/۲۲	۱/۱۸	۱/۳۰	۱/۰۷	۱/۱۵	۱/۲۹	۱/۳۰	۱/۱۴
W	۰/۶۲	۰/۴۴	۰/۵۷	۰/۴۳	۰/۳۶	۰/۵۳	۰/۷۵	۰/۶۶	۰/۶۸	۰/۴۱	۰/۴۵
Mo	۰/۸۳	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۶۲	۰/۴۵	۰/۰۴	۰/۶۸	۰/۴۶	۲/۰۶	۰/۶۲	۰/۵۰
As	۷/۴۹	۳۵/۱۵	۱۵/۸	۱۱/۹۱	۵/۰۶	۱۵/۴۵	۷/۴۲	۱۴/۲۷	۹/۸۷	۱۲/۹۳	۱۸/۱
Sb	۳/۲	۲/۱۶	۲/۱۶	۱/۴۲	۱/۵۶	۱/۲۴	۱/۲۶	۰/۸۴	۱/۱	۱/۱۳	۱/۲۳
Ag	۰/۲۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۴۰	۰/۱۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۱۷
Rb	۴۷	۵۱	۵۰	۱۵	۳۵	۳۲	۱۲	۹	۴	۴۶	۴۹
Cs	۲/۱۹	۲/۹۸	۲/۲۱	۱/۶۴	۲/۱۵	۲/۷۱	۱/۹۷	۲/۳۳	۰/۹۸	۳/۵۹	۳/۵۵
Ba	۴۰۳	۳۶۲	۶۳۲	۳۹۱	۲۷۷	۳۶۵	۲۸۰	۹۴	۱۴۰	۳۷۰	۳۱۸
Sr	۵۱۶	۴۶۶	۴۳۳	۴۸۲	۵۷۶	۳۳۰	۳۲۹	۳۱۱	۳۶۵	۵۴۰	۴۶۲
Ga	۱۸	۱۷	۲۱	۱۵	۱۶	۱۴	۱۳	۹	۹	۱۷	۱۶
Ta	۰/۱۵	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۲۳	۰/۱۳	۰/۱۱
Nb	۱۰/۵۰	۷/۶	۶/۹	۷	۷/۵	۷/۳	۷/۶	۷/۱	۸/۶	۷/۷	۷/۷
Hf	۲/۲۱	۲/۵۴	۲/۱۸	۳/۰۴	۲/۲۳	۲/۷۵	۲/۷۷	۲/۷۵	۳/۹۹	۲/۸۱	۲/۸۸
Zr	۷۲	۶۷	۵۷	۱۱۲	۷۴	۱۰۵	۹۱	۹۳	۱۳۸	۹۱	۹۰
Y	۲۰	۱۸	۱۵	۲۳	۲۰	۲۰	۱۹	۱۸	۲۱	۲۳	۲۲
Th	۳/۲۹	۴/۴۴	۴/۱۲	۴/۹	۳/۲۳	۳/۲۲	۲/۸۲	۳/۰۶	۴/۵۴	۴/۲۵	۴/۲۷
U	۰/۹۴	۱/۱۲	۱/۱۸	۱/۰۵	۰/۹۲	۰/۸۳	۰/۵۱	۰/۶۲	۰/۹۸	۱/۲۲	۱/۲۳
La	۱۰/۱۳	۸/۴۱	۸/۷۳	۱۰/۸۵	۱۰/۳۸	۹/۳۴	۸/۱۵	۹/۰۱	۱۴/۷۷	۱۳/۲۱	۱۲/۲۲
Ce	۲۴/۵۱	۱۸/۴۲	۲۰/۰۴	۲۵/۵۳	۲۴/۳۱	۲۱/۵۴	۱۸/۴۱	۲۰/۳۸	۲۹/۹۱	۲۹/۸۵	۲۸/۵۶
Nd	۱۳/۸۲	۹/۸۸	۹/۹۳	۱۴/۵۸	۱۳/۱۶	۱۱/۴۲	۱۱/۱۲	۱۲/۵۶	۱۷/۸۸	۱۶/۱۱	۷/۶۶
Sm	۳/۴۳	۲/۶۳	۲/۵۶	۳/۴۱	۳/۵۱	۲/۷۴	۲/۸۲	۳/۰۸	۴/۱۶	۳/۹۵	۳/۷۳
Eu	۱/۲۸	۰/۹۴	۱/۰۱	۱/۱۳	۱/۲۲	۰/۹۲	۰/۸۵	۰/۸۶	۰/۸۶	۱/۳۳	۱/۲۱
Gd	۳/۶۷	۳/۱۲	۳/۲۳	۳/۸۸	۳/۶۵	۳/۳۳	۳/۳۹	۳/۷۳	۴/۲۱	۴/۰۹	۳/۹۶
Tb	۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۳۸	۰/۵۵	۰/۴۷	۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۵۳	۰/۶۱	۰/۶۳	۰/۵۶
Dy	۳/۲۹	۲/۶۲	۲/۶۵	۳/۵۴	۳/۷	۲/۶۶	۲/۸۳	۳/۳۸	۳/۴۱	۳/۹۱	۳/۸۱
Ho	۰/۶۷	۰/۶۰	۰/۵۴	۰/۷۵	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۶۳	۰/۷۴	۰/۷۵	۰/۸۳	۰/۸۲
Er	۲/۱۱	۱/۸۶	۱/۷۵	۲/۴۸	۲/۹	۱/۹۹	۱/۹۷	۲/۳۶	۲/۲۸	۲/۶۳	۲/۶۷
Tm	۰/۳۲	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۳۳	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۳۷	۰/۳۷
Yb	۱/۶۵	۱/۴۸	۱/۴۳	۱/۹۵	۱/۴۸	۱/۶	۱/۵۹	۱/۷۲	۱/۷	۲/۶	۲/۱۶
Lu	۰/۲۸	۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۳۶	۰/۳۵

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.725]



شکل ۵ نمودارهای تفکیک و تعیین سری ماگمایی سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه (شمال غرب انارک): الف–نمودار Zr/TiO_2 - Nb/Y [۲۴]، ب) ماهیت آهکی قلیایی نمونه‌های مورد بررسی در نمودار SiO_2- Zr/TiO_2 [۲۴]، پ– ماهیت آهکی قلیایی نمونه‌های مورد بررسی در نمودار K_2O- SiO_2 [۲۳] و ت) نمودار Th/Yb- Ta/Yb [۲۲].

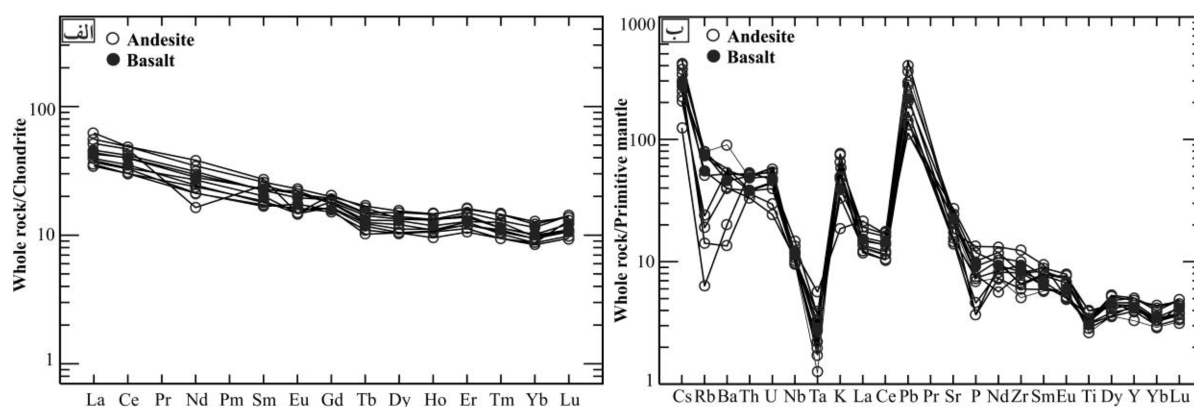
در نمودار بهنجار شده نسبت به ترکیب کندریت [۲۵] برای نمونه‌های مورد بررسی، غنی‌شدگی از عناصر خاکی نادر سبک (LREE) و تهی‌شدگی از عناصر خاکی نادر سنگی (HREE) دیده می‌شود (شکل ۶ الف). همچنین در این سنگ‌ها، ناهنجاری منفی ضعیفی از عنصر Eu مشاهده می‌گردد. در نمودار بهنجار شده نسبت به ترکیب گوشته اولیه [۲۶]، (شکل ۶ ب). نمونه‌های مورد بررسی از عناصر سنگ دوست درشت یون (LILE) غنی بوده و در مقابل از عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) فقیر هستند. در این نمودار، ناهنجاری منفی عناصر Ti، Nb و Ta و ناهنجاری مثبت عناصر Pb، Sr و K به خوبی دیده می‌شود.

بحث

سنگ‌شناسی

چنان که در پیشتر اشاره شد، در سنگ‌های آتشفشانی موجود در کوه بندسیاه دارای غنی‌شدگی از LREEها نسبت به HREEها دیده شده است. نمونه‌های مورد بررسی دارای ۳۰ تا حدود ۷۰ برابر غنی‌شدگی در مقدار عناصر خاکی نادر نسبت به کندریت هستند (شکل ۶ الف). بالا بودن مقادیر LREEها نسبت به HREEها بیانگر نقش مولفه‌های در ارتباط با فرایند فرورانش و نقش فرایندهایی چون هضم و آلایش پوسته‌ای است [۲۷]. نمودارهای بهنجارشده نسبت به کندریت برای سنگ‌های وابسته به با ماگماهای آهکی قلیایی سه قسمتی بوده و در آنها سه بخش متفاوت LREE، MREE و HREE را می‌توان تفکیک کرد، این سه بخشی بودن نمودار اهمیت عناصر خاکی نادر متوسط (MREE) طی تبلور و تشکیل سنگ‌ها را نشان می‌دهد و بیانگر نقش آمفیبول در تشکیل این سنگ-هاست [۲۸]. در نمودار بهنجار شده نسبت به کندریت، ناهنجاری منفی بسیار ضعیفی از عنصر Eu دیده می‌شود که می‌تواند در ارتباط با بالا بودن گریزندگی اکسیژن و جدا شدن یا تبلور بخشی پلاژیوکلاز در آغاز جدایش از ماگمای ایجاد کننده سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه باشد [۳۰،۲۹].

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.725]



شکل ۶ نمودارهای بهنجار شده سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه (شمال غرب انارک): الف- الگوی عناصر خاکی نادر بهنجارشده نسبت به ترکیب کندریت [۲۵] و ب) نمودار چند عنصری بهنجار شده نسبت به ترکیب گوشته اولیه [۲۶].

بررسی الگوی عناصر در نمودار چند عنصری بهنجارشده نسبت به ترکیب گوشته اولیه برای این سنگ‌ها نشان می‌دهد که LILEها دارای غنی‌شدگی نسبت به ترکیب گوشته هستند (شکل ۶ ب). در روند کلی این نمونه‌ها غنی‌شدگی از LILEها چون Cs، K و Pb نسبت به HFSEها وجود دارد. غنی‌شدگی از LILEها و تهی شدگی از عناصری چون Ti، Nb و Ta بیانگر فرایندهای مربوط به فرورانش و تشکیل سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه در ارتباط با فرایندهای کوهزایی است [۳۱-۳۴]. ناهنجاری منفی Ti در نمودار چندعنصری بهنجار شده به گوشته اولیه برای این نمونه‌ها دیده می‌شود. بررسی های آزمایشگاهی انجام شده برای ذوب بازالت‌ها نشان می‌دهد که وجود کانی‌هایی چون روتیل و ایلمنیت در فاز باقیمانده منجر به مذاب‌هایی با مقدار TiO_2 پایین می‌گردد [۳۵، ۳۶]. در ماگماهای آهکی قلیایی، سیال‌های برآمده از آبزدایی تختال عامل دگرنهادی گوشته هستند [۳۱] و ماگمای برآمده از آن‌ها غنی شده از LILEها و تهی‌شده از عناصر Ta، Nb و Ti است. غنی‌شدگی از LILEها و LREE ها در این نمونه‌ها بیانگر اثر سیال‌ها بر گوه گوشته‌ای است که این سیال‌ها می‌توانند از سنگ کره اقیانوسی فرورونده و یا از رسوب‌های همراه با آن‌ها شکل گرفته باشند [۳۷]. همچنین در این نمودار، Zr و Hf رفتار مشابهی دارند که نبود عوامل گسترده دگرنهادی کربناتی را نشان می‌دهد. غنی‌شدگی از Cs، Th و U می‌تواند بیانگر رخداد آلایش پوسته‌ای در ماگمای مورد نظر باشد [۳۸،۳۹].

سنگ خاستگاه و جایگاه زمین ساختی

مقادیر ارائه شده برای تفکیک ماگماهای با ماهیت آداکیتی از ماگماهای آهکی قلیایی معمول نشان می‌دهد که ماگمای مادر سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه از نظر ترکیب شیمیایی ویژگی مذاب‌های آهکی قلیایی را دارد (شکل ۷ الف). برای تعیین ماهیت سنگ خاستگاه ماگمای ایجاد کننده سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه از داده‌ها و نمودارهای زمین شیمیایی مختلفی استفاده شد، برای مثال، نمودارهای Sm/Lu نسبت به La/Sm از [۴۰] و La/Yb نسبت به Dy/Yb از [۴۱] نشان می‌دهند که این ماگما در اثر ذوب سنگ خاستگاه اسپینل لرزولیتی ایجاد گشته است (شکل‌های ۷ ب و پ). براساس نمودارهای La/Yb نسبت به Dy/Yb [۴۱] و Na_2O+K_2O نسبت به Al_2O_3/SiO_2 [۴۲]، ماگمای ایجاد کننده‌ی سنگ- های آتشفشانی کوه بندسیاه از ذوب بخشی با درجه کمتر از ۱۵ درصد تشکیل شده اند (شکل‌های ۷ پ و ت).

مذاب‌هایی که در اثر ذوب بخشی گوشته سست کره‌ای ایجاد می‌گردند نسبت به مذاب‌های برآمده از گوشته سنگ کره ای، از HFSEها غنی شده و از عناصری چون K و Pb تهی شده هستند [۴۳، ۴۴]. به طور کلی، نسبت La/Nb شاخصی در بررسی خاستگاه گوشته سنگ کره‌ای یا سست کره‌ای ماگماهاست [۴۵]. نسبت La/Nb در سنگ‌های مورد بررسی مقادیر بالایی بین ۰/۹۶ تا ۱/۷۱ (میانگین برابر با ۱/۳۲) دارد و نشان می‌دهد که ماگمای مادر این سنگ‌ها در اثر ذوب یک خاستگاه گوشته سنگ کره‌ای تولید شده است [۴۵]. همچنین نسبت Zr/Ba شاخصی برای تشخیص خاستگاه گوشته سنگ کره‌ای از گوشته سست کره‌ای است [۴۶]. نسبت Zr/Ba برای گوشته سنگ کره‌ای ۰/۳-۰/۵ و برای گوشته سست کره‌ای بیش از ۰/۵ است [۴۶]. این نسبت در سنگ‌های آتشفشانی

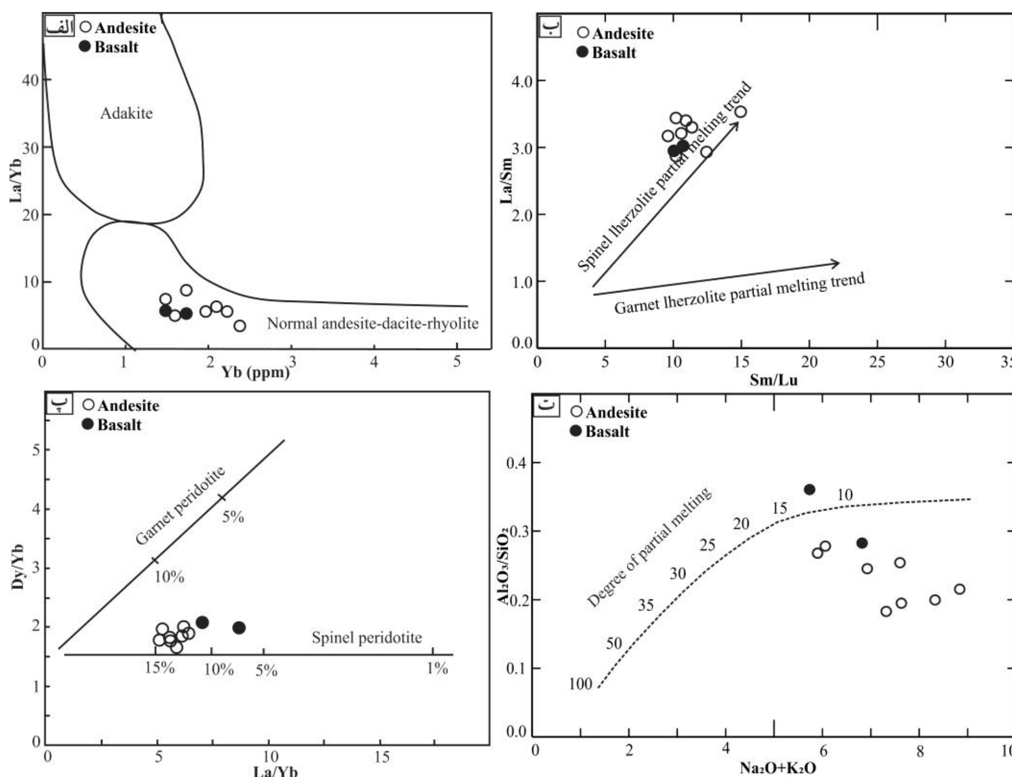
[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.725]

کوه بندسیاه بطور میانگین ۰/۳۷ بوده و نشان دهنده‌ی سنگ خاستگاه گوشته سنگ کره‌ای برای این سنگ‌هاست.

ترکیب کانی شناسی و زمین شیمیایی گوشته در معرض عواملی چون فرآیند جدایش مذاب و دگرنهادی است [۴۷]. فرآیند دگرنهادی در مدت طولانی رخ می‌دهد و اثر بسیار مهمی بر کانی‌ها، ترکیب شیمیایی و ساختار گوشته دارد [۴۸]. واکنش بین پریدوتیت و سیال‌های دگرنهاد کننده، به مقدار سیال و نفوذ آن‌ها، فراوانی، تحرک و نرخ توزیع عناصر بستگی دارد [۴۹]. دگرنهادی می‌تواند مقدار عناصر کمیاب پریدوتیت‌ها را، حتی برای عناصر سازگار چون Sc، Y و Yb تغییر دهد [۵۰].

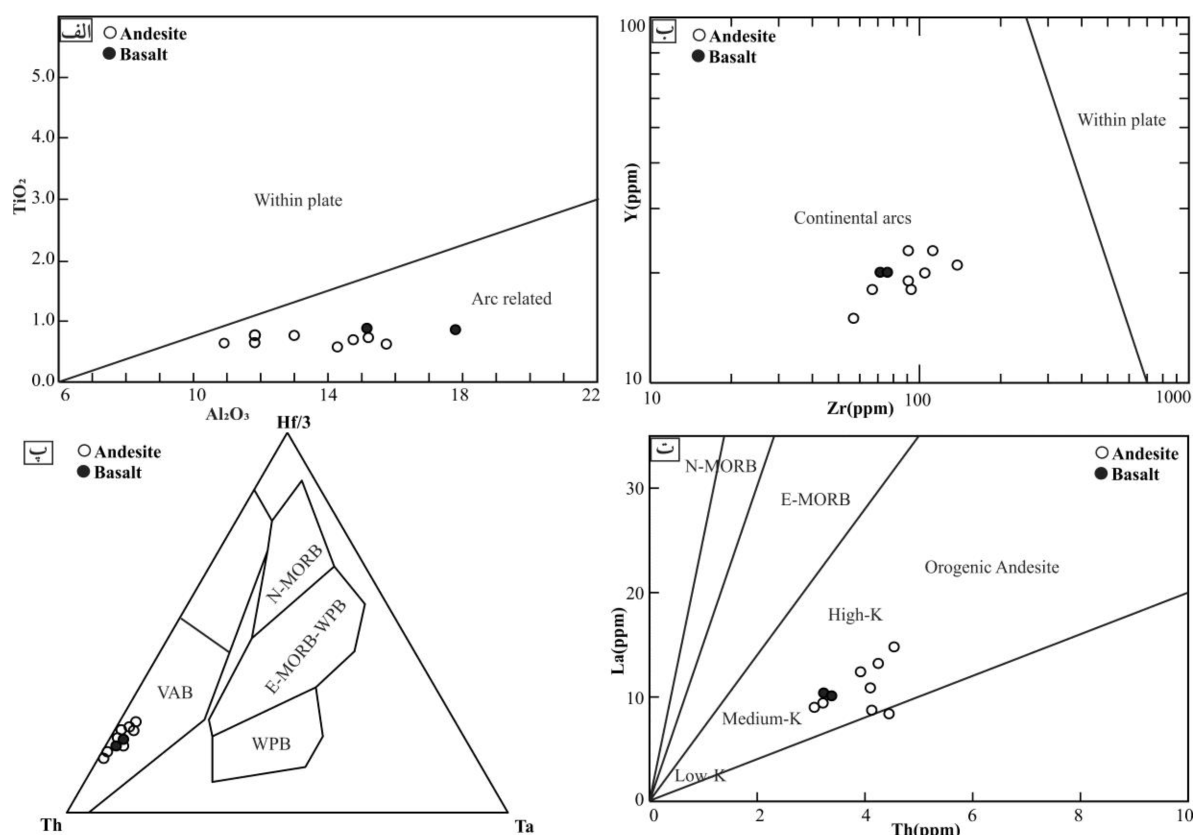
غنی شدگی LILEها، به اثر سنگ کره فرورونده و دگرنهادی گوشته نسبت داده می شود به این صورت که سیال - ها و ترکیب‌های آبدار آزاد شده از صفحه اقیانوسی دگرسان شده در حال فرورانش باعث غنی شدگی گوشته بالای صفحه فرورونده از عناصر ناسازگار می‌شوند [۵۱]. برای تشخیص غنی شدگی در محل سنگ خاستگاه از نسبت‌های عنصری مختلفی چون Nb/Zr و Y/Zr استفاده می‌گردد. میانگین این نسبت‌ها در سنگ‌های مورد بررسی در کوه بندسیاه به ترتیب برابر با ۰/۰۸ و ۰/۲۲ بوده و بیانگر گوشته غنی شده در محل سنگ خاستگاه هستند [۵۳]. نسبت بالای Th/Yb به احتمال بسیار بیانگر سنگ خاستگاه گوشته‌ای است که در اثر فرایندهای در ارتباط با فرورانش و یا فرایندهای مربوط به آلایش پوسته‌ای، دچار دگرنهادی و غنی شدگی شده است [۵۴].

برای شناسایی و بررسی جایگاه زمین شناسی سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه از نمودارهای TiO_2 نسبت به Al_2O_3 و Y نسبت به Zr استفاده شد (شکل‌های ۸ الف و ب). با توجه به مقادیر عناصر مختلف و نتایج بدست آمده از این نمودارها، سنگ‌های آتشفشانی مورد بررسی ویژگی‌های در ارتباط با فعالیت ماگمایی رخ داده در کمان‌های آتشفشانی را نشان می - دهند (شکل ۸). همچنین استفاده از نمودار مثلثی Hf، Th و Ta [۵۵]، بیانگر ارتباط سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه با فعالیت ماگمایی در کمان‌های آتشفشانی است (شکل ۸ پ). با توجه به مقادیر Th نسبت به La [۵۶]، سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه ویژگی‌های مربوط به آندزیت‌های کوهزایی را نشان می‌دهند (شکل ۸ ت).



شکل ۷ نمودارهای زمین شیمیایی تعیین سنگ خاستگاه و درجه ذوب‌بخشی در سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه (شمال غرب انارک): الف) نمودار La/Yb- Yb برای تفکیک مذاب‌های معمول آهکی قلیایی از مذاب‌های آداکیتی [۵۲]، ب- نمودار La/Sm- Sm/Lu [۴۰]، پ) نمودار Dy/Yb- La/Yb [۴۱]. ت) نمودار Al_2O_3/SiO_2- Na_2O+K_2O [۴۲].

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.725]



شکل ۸ نمودارهای زمین شیمیایی تعیین محیط زمین ساختی سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه (شمال غرب انارک): الف) نمودار TiO_2- Al_2O_3 برای تفکیک مذاب‌های در ارتباط با بازشدگی‌ها و مذاب‌های تشکیل شده در محیط‌های کمان [۵۷]، ب) نمودار Y- Zr [۵۷]، پ) نمودار مثلثی Hf/3- Th- Ta [۵۵] و ت) نمودار La- Th برای تفکیک آندزیت‌های کوهزایی از سایر آندزیت‌ها [۵۶].

با توجه به اینکه سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه ویژگی‌های زمین شیمیایی در ارتباط با فرورانش را نشان می‌دهند، باید در مورد پوسته اقیانوسی فرورونده و مکان فرورانش بحث گردد. از آنجا که فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس در راستای روراندگی فعلی زاگرس از منطقه مورد بررسی فاصله بسیاری دارد و بر عکس همه شواهد مربوط به فرورانش پوسته اقیانوسی نایین- عشین را در این منطقه می‌توان دید، تشکیل سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه را می‌توان به فرورانش پوسته اقیانوسی نایین- عشین نسبت داد.

برداشت

کوه بندسیاه در کرانه غربی خرد قاره شرق- ایران مرکزی (غرب قطعه یزد) و در کنار آمیزه افیولیتی عشین قرار دارد. بررسی‌های صحرایی بیانگر حضور گدازه‌هایی با ترکیب غالب آندزیتی و به مقدار کمتر بازالتی با سن ائوسن- الیگوسن [۱۹] در این منطقه است.

مهم‌ترین کانی‌های تشکیل دهنده‌ی آندزیت‌های کوه بندسیاه پلاژیوکلاز، آمفیبول و کلینوپیروکسن هستند. کانی‌های ثانویه نیز شامل کلریت و کلسیت هستند که در اثر دگرسانی آمفیبول و پلاژیوکلاز شکل گرفته‌اند. بافت‌های عمده موجود در این سنگ‌ها شامل پورفیری، گلومروپورفیری و تراکیتی هستند. داده‌های زمین شیمیایی سنگ کل و نمودارهای مختلف نشان می‌دهد که سنگ‌های مورد بررسی در یک کمان ماگمایی و در ارتباط با فرورانش تشکیل شده‌اند. این سنگ‌ها ماهیت ماگماهای آهکی قلیایی را نشان می‌دهند.

غنی‌شدگی از LREEها و LILEها، تهی‌شدگی از HREEها و HFSEها و ناهنجاری منفی عناصر Ti، Nb و Ta نشان می‌دهد که ماگمای مادر سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه یک خاستگاه گوشته سنگ کره‌ای وابسته به محیط‌های فرورانش دارد. بررسی‌های زمین شیمیایی نشان می‌دهند که سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه از یک ماگما با سنگ خاستگاه اسپینل پریدوتیت تشکیل شده‌اند که درجه ذوب

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.725]

بخشی آن کمتر از ۱۵ درصد بوده است. غنی شدگی از LILEها و ناهنجاری مثبت عناصری چون K و Sr به اثر سنگ کره فرورونده و دگرنهادی گوشته نسبت داده می شود به این صورت که سیال‌ها و ترکیب‌های آزاد شده از صفحه اقیانوسی در حال فرورانش باعث غنی شدگی گوشته بالایی صفحه فرورونده شده است. بررسی‌های زمین شیمیایی نشان می‌دهند که ماگمای ایجاد کننده‌ی سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه افزون بر آنکه دستخوش فرایندهایی چون دگرنهادی و جدایش شده، طی صعود و نزدیک شدن به سطح زمین دچار فرایند آلایش ماگمایی نیز شده است. ناهنجاری مثبت Pb و نسبت های بالای La/Nb و U/Nb از شواهد زمین شیمیایی مربوط به رخداد آلایش ماگمایی هستند. وجود لبه‌های خورده شده پیرامون کانی‌هایی چون پلاژیوکلازها، کوارتز و آمفیبول، بافت غربالی در پلاژیوکلازها و وجود بالشتک‌ها یا قطرک‌های تیره رنگ در درون سنگ های آندزیتی منطقه از جمله شواهد سنگ نگاری مربوط به آلایش ماگمایی هستند.

با توجه به موقعیت سنگ‌های آتشفشانی کوه بندسیاه می- توان گفت که فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس (افیولیت‌های نایین و عشین) باعث فعالیت فعالیت ماگمایی در ارتباط با فرورانش ائوسن- الیگوسن در این منطقه شده است.

قدردانی

نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه اصفهان برای حمایت‌های مالی تشکر می‌نمایند.

مراجع

[1] Hora J.M., Singer B.S., Wörner G., *Volcano evolution and eruptive flux on the thick crust of the Andean Central Volcanic Zone: 40Ar/39Ar constraints from Volcan Parinacota, Chile*", Geological Society of America Bulletin 119 (2007) 343-362. https://doi.org/10.1130/B25954.1

[2] Singer B S., Jicha B.R., Harper M.A., Naranjo J.A., Lara L.E., Moreno-Roa H., *Eruptive history, geochronology, and magmatic evolution of the Puyehue-Cordón Caulle volcanic complex, Chile*", Geological Society of America Bulletin 120 (2008) 599-618. https://doi.org/10.1130/B26276.1

[3] Hildreth W., Fierstein J., *Eruptive history of Mount Katmai, Alaska*", Geosphere 8 (2012) 1527-1567. https://doi.org/10.1130/GES00817.1

[4] Conway C.E., Gamble J.A., Wilson C J., Leonard G.S., Townsend D.B., Calvert A.T., *New petrological, geochemical, and geochronological perspectives on andesite-dacite magma genesis at Ruapehu volcano, New Zealand*", American Mineralogist 103 (2018) 565-581. https://doi.org/10.2138/am-2018-6199

[5] Eyuboglu Y., Dudas F.O., Santosh M., Eroğlu-Gümrük T., Akbulut K., Yi K., Chatterjee N., *The final pulse of the Early Cenozoic adakitic activity in the Eastern Pontides Orogenic Belt (NE Turkey): An integrated study on the nature of transition from adakitic to non-adakitic magmatism in a slab window setting*", Journal of Asian Earth Sciences 157 (2018) 141–165. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.07.004

[6] Salim H., Torabi G., Nosouhian N., *Mineralogy of anorthosite veins and host gabbros in the Kal-e-Kafi intrusive body (northeast of Anarak, Isfahan Province, Central Iran)*", Journal of Economic Geology 14 (2022) 115-141. (in persian) https://doi.org/10.22067/econg.2021.68737.1008

[7] Shadman P., Torabi G., Morishita T., *Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from Central Iran (Southeast of Khur, Isfahan Province); an Evidence of Neotethys Syn-Subduction Magmatism*", Petrology 30 (2022) 671-689. https://doi.org/10.1134/S0869591122060042

[8] Jamshidzaei A., Torabi G., Morishita T., Tamura A., *Eocene dike swarm and felsic stock in Central Iran: roles of metasomatized mantle wedge and Neo-Tethyan slab*", Journal of Geodynamics 145 (2021) 101844. https://doi.org/10.1016/j.jog.2021.101844

[9] Tabatabaei Manesh S.M., Mahmoodabadi L., Mirlohi A.S., "*Geochemistry of the Eocene volcanic rocks in the SW of Jandaq (NE of Isfahan province)*", Petrological Journal 4 (2013) 79-92. (in persian)

[10] Goli Z., Torabi G., Arai S., *High-K calc-alkaline Eocene volcanic rocks from the Anarak area (Central Iran): A key structure for the early stages of oceanic basin closure and the beginning of collision*", Geotectonics 55 (2021) 600-617. https://doi.org/10.1134/S0016852121040075

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.725]

Explanatory text of the Anarak quadrangle map, 1:250.000", Geological Survey of Iran, Tehran, V/O Technoexport Report TE/No. 19 (1984).

[20] Middlemost E.A., "*Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks*", Chemical geology 77 (1989) 19-26. https://doi.org/10.1016/0009-2541(89)90011-9

[21] Whitney D. L., Evans B.W., "*Abbreviations for names of rock-forming minerals*", American mineralogist 95 (2010) 185-187. https://doi.org/10.2138/am.2010.3371

[22] Pearce J.A., "*Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: C.J. Hawkesworth and M.J. Norry (Editors), Continental Basalts and Mantle Xenoliths*", Shiva, Nantwich, Cheshire (1983) 230–249. http://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/8626

[23] Le Maitre R.W., Bateman P., Dudek A., Keller J., Lameyre J., Le Bas M.J., Sabine P.A., Schmid R., Sorensen H., Streckeisen A., Woolley A.R., "*A classification of igneous rocks and glossary of terms. Recommendations of the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous rocks*", (1989).

[24] Winchester J.A., Floyd P.A., "*Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements*", Chemical geology 20 (1977) 325-343. https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2

[25] McDonough W.F., Sun S.S., "*The composition of the Earth*", Chemical geology 120 (1995) 223-253. https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4

[26] Sun S.S., McDonough W.F., "*Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes*", Geological Society of London, Special Publications 42 (1989) 313–345. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

[27] Peccerillo A., Dallai L., Frezzotti M.L., Kempton P.D., "*Sr–Nd–Pb–O isotopic evidence for decreasing crustal contamination with ongoing magma evolution at Alicudi volcano (Aeolian arc, Italy): implications for style of magma-crust interaction and for mantle source compositions*", Lithos, 78 (2004), pp. 217–233. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.040

[11] Rajabi S., Torabi G., Arai S., "*Oligocene crustal xenolith-bearing alkaline basalt from Jandaq area (Central Iran): implications for magma genesis and crustal nature*", Island Arc 23 (2014) 125-141. https://doi.org/10.1111/iar.12063

[12] Torabi G., *Middle Eocene volcanic shoshonites from western margin of Central-East Iranian Microcontinent (CEIM), a mark of previously subducted CEIM-confining oceanic crust*", Petrology 19 (2011) 675-689. https://doi.org/10.1134/S0869591111030039

[13] Ahmadian J., Bahadoran N., Torabi G., Murata M., "*Geochemistry and Petrogenesis of volcanic rocks from the Arousan-e-Kaboudan (NE of Anarak)*", Petrological Journal 1(2010) 103-120. (in persian)

[14] Sargazi M., Torabi G., Morishita T., "*Petrological characteristics of the Middle Eocene Toveireh pluton (southwest of Jandaq, central Iran): implications for the eastern branch of the Neo-Tethys subduction*", Turkish Journal of Earth Sciences 28 (2019) 558-588. https://doi:10.3906/yer-1807-45

[15] Stöcklin J., *Structural history and tectonics of Iran: a review*", American Association of Petroleum Geologists Bulletin 52 (1968): 1229-1258.

[16] Ramezani J., Tucker R. D., *The Saghand region, central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics*", American journal of science, 303 (2003), 622-665. https://doi.org/10.2475/ajs.303.7.622

[17] Tadayon M., Rossetti F., Zattin M., Nozaem R., Calzolari G., Madanipour S., Salvini F., *The post-Eocene evolution of the Doruneh fault region (Central Iran): The intraplate response to the reorganization of the Arabia-Eurasia collision zone*", Tectonics 36 (2017) 3038-3064. https://doi.org/10.1002/2017TC004595

[18] Aistov L., Melanikov B., Krivyokin B., Morozov L. Kiristaev V., "*Geology of Khur Area (Central Iran)*", Geological Survey of Iran, Tehran Report 20 (1984) 131 pp.

[19] Sharkovski M., Susov M., Krivyakin B., "*Geology of the Anarak area (Central Iran),*

[28] Rollinson H.R., *"Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation"*, (1st ed.) Routledge (1993) 384 pp. https://doi.org/10.4324/9781315845548

[29] Martin H., *"Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids"*, Lithos 46 (1999) 411-429. https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00076-0

[30] Barnes S.J., van Achterbergh E., Makovicky E., Li C., *"Proton microprobe results for the partitioning of platinum-group elements between monosulphide solid solution and sulphide liquid South African"*, Journal of Geology 104 (2001) 275-286. https://doi.org/10.2113/gssajg.104.4.275

[31] Martin H., Smithies R.H., Rapp R., Moyen J.F., Champion D., *"An overview of adakite, tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution"*, Lithos 79 (2005) 1-24. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.048

[32] Kuscu, G.G. and Geneli, F., *"Review of post-collisional volcanism in the Central Anatolian Volcanic Province (Turkey), with special reference to the Tepekoy Volcanic Complex"*, International Journal of Earth Sciences 99 (2010) 593–621. https://doi.org/10.1007/s00531-008-0402-4

[33] Chashchin A.A., Sorokin A.A., Lebedev V.A., Blokhin M.G., *"Age, main geochemical characteristics, and sources of late Cenozoic volcanic rocks in the Udurchukan volcanic area (Amur Region)"* , Russian Journal of Pacific Geology 10 (2016) 239–248. https://doi.org/10.1134/S1819714016040035

[34] Yu Q., Ge W.C., Zhang J., Zhao G.C., Zhang Y.L., Yang H., *"Geochronology, petrogenesis and tectonic implication of Late Paleozoic volcanic rocks from the Dashizhai Formation in Inner Mongolia, NE China"*, Gondwana Research 43 (2017) 164-177. https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.01.010

[35] Rapp R.P., Watson E.B., *"Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling"*, Journal of petrology 36 (1995) 891-931. https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891

[36] Kamber B.S., Ewart A., Collerson K.D., Bruce M.C., McDonald G.D., *"Fluid-mobile trace element constraints on the role of slab melting and implications for Archaean crustal growth models"*, Contributions to Mineralogy and Petrology 144 (2002) 38-56. https://doi.org/10.1007/s00410-002-0374-5

[37] Hawkesworth C.J., Hergt J.M., McDermott F., Ellam R.M., *"Destructive margin magmatism and the contributions from the mantle wedge and subducted crust"*, Australian Journal of Earth Sciences 38 (1991) 577-594. https://doi.org/10.1080/08120099108727993

[38] Wang Q., Xu J.F., Zhao Z.H., Bao Z.W., Xu W., Xiong X.L., *"Cretaceous high-potassium intrusive rocks in the Yueshan-Hongzhen area of east China: Adakites in an extensional tectonic regime within a continent"*, Geochemical Journal 38 (2004) 417-434. https://doi.org/10.2343/geochemj.38.417

[39] Guo F., Li H., Fan W., Li J., Zhao L., Huang M., Xu W., *"Early Jurassic subduction of the Paleo-Pacific Ocean in NE China: Petrologic and geochemical evidence from the Tumen mafic intrusive complex"*, Lithos 224 (2015) 46-60. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.02.014

[40] Tegner C., Lesher C.E., Larsen L.M., Watt W.S., *"Evidence from the rare-earth element record of mantle melting for cooling of the Tertiary Iceland mantle plume"*, Nature 395 (1998) 591-594. https://doi.org/10.1038/26956

[41] Sen P.A., Temel A., Gourgaud A., *"Petrogenetic modelling of Quaternary post-collisional volcanism: a case study of central and eastern Anatolia"*, Geological Magazine 141 (2004) 81-98. https://doi.org/10.1017/S0016756803008550

[42] Chen C.H., *"Estimation of the degree of partial melting by Na2O+K2O and Al2O3/SiO2 of basic magmas,"* Chemical Geology, 71 (1988) 355–364. https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90059-9

[43] DePaolo D.J., Daley E.E., *Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental*

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.725]

highly alkaline, silicate-and carbonate-rich melts (Kerguelen Islands, Indian Ocean)", Journal of Petrology 41 (2000) 477-509. https://doi.org/10.1093/petrology/41.4.477

[51] Saunders A.D., Tarney J., Weaver S.D., "*Transverse geochemical variations across the Antarctic Peninsula: implications for the genesis of calc-alkaline magmas*", Earth and Planetary Science Letters 46 (1980) 344-360. https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90050-3.

[52] Defant M.J., Drummond M.S., "*Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere*", nature 347 (1990) 662-665.

[53] Nikitina L.P., Babushkina M.S., "*Nb–Zr–Y Systematics and Thermal Regimes of Subcontinental Lithospheric Mantle in the Archaean: Data from Mantle Xenoliths*", Izvestiya, Physics of the Solid Earth 57 (2021) 217-231. https://doi.org/10.1134/S1069351321020075

[54] Helvacı C., Ersoy E.Y., Sözbilir H., Erkül F., Sümer Ö., Uzel B., "*Geochemistry and 40Ar/39Ar geochronology of Miocene volcanic rocks from the Karaburun Peninsula: Implications for amphibole-bearing lithospheric mantle source, Western Anatolia*", Journal of Volcanology and Geothermal Research 185 (2009) 181-202. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.05.016

[55] Wood D.A., *The application of a ThHfTa diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province*", Earth and Planetary Science Letters 50 (1980) 11-30. https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90116-8

[56] Gill J.B., "*Orogenic andesites and plate tectonics*", Springer, Berlin (1981) 392 pp.

[57] Muller D., Groves D.I., "*Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization*", Springer, Berlin (1997) 398 pp.

extension", Chemical Geology 169 (2000) 157-185. https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00261-8

[44] Zeng G., Chen L.H., Xu X.S., Jiang S.Y., Hofmann A.W., "*Carbonated mantle sources for Cenozoic intra-plate alkaline basalts in Shandong, North China*", Chemical Geology 273 (2010) 35-45. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.02.009

[45] Fu D., Huang B., Peng S., Kusky T.M., Zhou W., Ge M., "*Geochronology and geochemistry of late Carboniferous volcanic rocks from northern Inner Mongolia, North China: Petrogenesis and tectonic implications*", Gondwana Research 36 (2016) 545-560. https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.08.007

[46] Kurkcuoglu B., "*Geochemistry and petrogenesis of basaltic rocks from the Develidag volcanic complex, Central Anatolia, Turkey*", Journal of Asian Earth Sciences 37 (2010) 42-51. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.07.004

[47] Fodor R.V., Sial A.N., Gandhok G., "*Petrology of spinel peridotite xenoliths from northeastern Brazil: Lithosphere with a high geothermal gradient imparted by Fernando de Noronha plume*", Journal of South American Earth Sciences 15 (2002) 199-214. https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00032-9

[48] Gasparik T., Litvin Y.A., "*Experimental investigation of the effect of metasomatism by carbonatic melt on the composition and structure of the deep mantle*", Lithos 60 (2002) 129-143. https://doi.org/10.1016/S0024-4937(01)00078-0

[49] Yu J.H., O'REILLY S.Y., Zhang M., Griffin W.L., Xu X., "*Roles of melting and metasomatism in the formation of the lithospheric mantle beneath the Leizhou Peninsula, South China*", Journal of Petrology 47 (2006) 355-383. https://doi.org/10.1093/petrology/egi078

[50] Gregoire M., Moine B.N., O'REILLY S.Y., Cottin J.Y., Giret A., "*Trace element residence and partitioning in mantle xenoliths metasomatized by*

[DOI: 10.61186/ijcm.32.4.725]